

# 凹形球面石英窗对碟式系统腔体吸热器 光学性能的影响

聂笃忠<sup>1,2</sup>, 颜 健<sup>1</sup>, 彭佑多<sup>1</sup>, 刘永祥<sup>1</sup>, 曾辉藩<sup>1,2</sup>, 彭德平<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201; 2. 湖南科技职业学院智能装备技术学院, 长沙 410004)

**摘 要:** 吸热器表面非均匀且高强度流载荷会降低其工作效率、安全性和服役寿命。提出一种凹形球面石英窗用于太阳能碟式聚光系统的腔体吸热器,可改善吸热器的能流均匀性、降低最大局部聚光比等光学性能指标。基于蒙特卡洛光线追迹法,考虑腔体吸热器由等开口、等面积和等高度三者共同约束,研究圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形4种腔体结构吸热器的光学性能。研究表明:采用平面石英窗时4种腔体结构吸热器的非均匀系数分别为0.60、0.86、0.70和0.74,最大局部聚光比分别为1050.0、1350.0、1190.0和1080.0;而采用凹形球面石英窗时4种腔体结构吸热器光学效率和采用平面石英窗时基本相同,但吸热器的非均匀系数分别下降到0.36、0.62、0.54和0.60,最大局部聚光比分别下降到743.7、922.2、916.5和1000.4,采用凹形球面石英窗比平面石英窗对各吸热器的光学性能均有明显提高,且其中圆柱形腔体吸热器比另外3种结构吸热器具有更好的光学性能。

**关键词:** 太阳能; 抛物聚光器; 光学性能; 能流均匀性; 腔体吸热器; 石英窗

**中图分类号:** TK513.3

**文献标志码:** A

## 0 引 言

腔体吸热器是碟式太阳能聚光集热系统中将太阳辐射能转换成工质热能的关键设备<sup>[1]</sup>;经石英窗进入腔体吸热器的能流分布存在高度的非均匀性特点<sup>[2]</sup>,会使吸热表面产生局部过热与温度梯度过大的不利现象<sup>[3]</sup>;针对有压容积式高温空气吸热器而言,不均匀的温度分布会造成反射膜、石英窗和吸热体等关键组件的烧毁<sup>[4]</sup>;较高的温度梯度也会使管壁产生较高的热应力,同时局部过热易使吸热管壁产生高温熔盐腐蚀与高温蠕变现象<sup>[5]</sup>。

为使吸热器形成封闭的腔体,目前主要通过通过在吸热器上加装平面石英窗<sup>[6]</sup>、双平面石英窗形成容积式吸热器实现<sup>[1]</sup>;同时为更加强化石英窗的力学性能,等厚度的曲面形石英窗是另一种成功的设计,如安装在加热汽轮机循环空气吸热器上的半球形石英窗<sup>[7]</sup>、半椭圆凹形石英窗<sup>[8]</sup>。除上述应用外,石英窗因其光学特性,进入吸热器表面的光辐射会因折射现象而进行二次分配<sup>[9]</sup>。

吸热器在工作时的能流分布存在高度非均匀性特点,目前腔体吸热器采用的石英窗结构设计主要从密封功能、力学性能方面来考虑,未考虑凹形石英窗对进入吸热器腔体表面的光辐射进行二次分配能改善吸热器光学性能这一影响。本文提出一种用于腔体吸热器上的凹形球面石英窗,将其分别安装在等开口、等面积和等高度三者共同约束下的圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形4种不同结构的吸热器上,将吸热器用于太阳能碟式聚光器-腔体吸热器系统中;基于蒙特卡洛光线追迹法对吸热器的光学效率、局部聚光比(LCR)分布、能流分布非均匀系数、最大局部聚光比在内的光学性能参数进行研究,并和采用平面石英窗的吸热器光学性能进行对比分析。

## 1 物理模型

本文以太阳能碟式聚光器-腔体吸热器系统(SDCR)<sup>[10]</sup>为研究对象;如图1所示,该系统由抛物碟式聚光器和安装石英窗的腔体吸热器组成,其中抛物碟式

收稿日期: 2019-11-18

基金项目: 湖南省自然科学基金(2019JJ50202, 2019JJ40085); 国家自然科学基金(51641504); 湖南省教育厅科学研究项目(18B565)

通信作者: 彭佑多(1964—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事太阳能光热发电利用和复杂机电系统集成研究。

ypeng@hnust.edu.cn

聚光器由许多镜片单元组装形成一个完整的抛物面;吸热器上安装石英窗,石英窗的中心位置位于碟式聚光器的焦点  $F$  上;当系统处于工作状态时,抛物碟式聚光器通过定日跟踪器使其保持太阳的视运动,确保太阳光辐射直射在抛物碟上,经碟式聚光器聚集的太阳光辐射通过石英窗大部分进入吸热器内表面,少部分则被石英窗吸收或经石英窗反射进入大气中,进入吸热器腔体的光辐射也有部分会通过吸热器接收表面的反射从石英窗再次逃逸。如图 1 所示,本项目以目前课题组正在研究的 38 kW SDCR 系统<sup>[10]</sup>为研究对象,碟式聚光器的具体参数:半径  $R=8850$  mm,焦距  $f=9490$  mm,碟式聚光器的镜面反射率为 0.92,吸收率为 0.08。

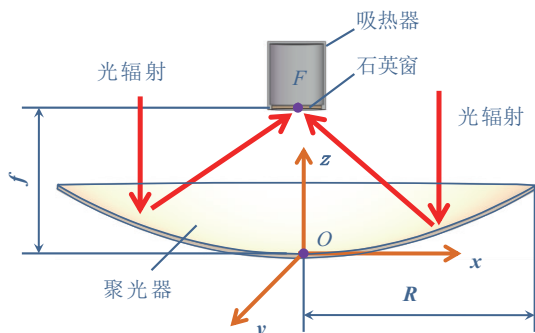


图1 太阳能碟式聚光器-腔体吸热器系统

Fig. 1 Solar dish concentrator/cavity receiver system

太阳能腔体吸热器是进行太阳能光热转换的关键设备,吸热器的结构会直接影响到进入吸热器腔体的能流分布非均匀系数、最高局部聚光比等光学性能指标。目前使用的吸热器主要有圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形<sup>[11]</sup>等结构的吸热器。为研究球面凹形石英窗对腔体吸热器的光学性能影响,本文采用基于等开口、等高度和等面积三者共同约束的圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形 4 种结构的吸热器。如图 2 所示,4 种吸热器的开口直径均为石英窗的外径  $D_{qw}$  且相等,高度  $H_{ca}$  均相等,以吸热器的顶点  $O_s$  为起点对吸热器展开的长度计为  $L$ ,吸热器吸收表面的直径为  $D_{ca}$ 、 $D_{ca1}$ ,各腔

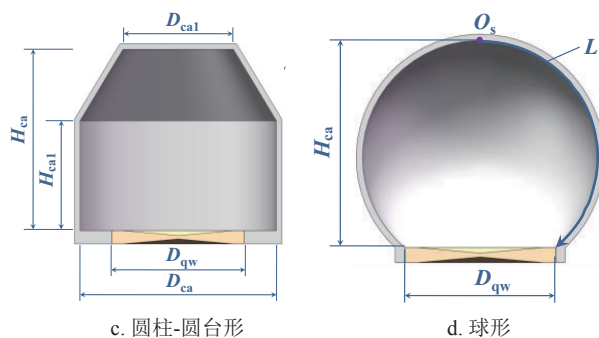
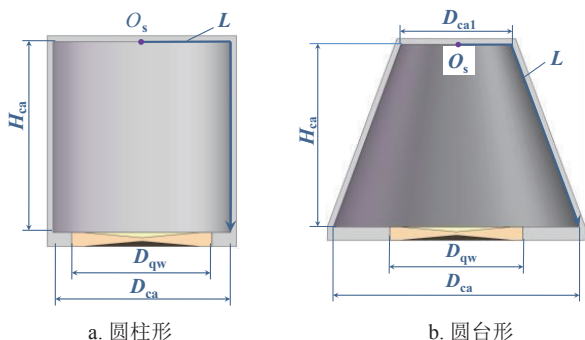


图2 腔体吸热器结构图

Fig. 2 Structure of cavity receiver

体吸热器尺寸参数如表 1 所示。腔体吸热器接收表面吸收率为 0.95,反射率为 0.05。

表1 腔体吸热器参数

Table 1 Parameters of cavity receiver

单位:mm

吸热器	$D_{qw}$	$D_{ca}$	$D_{ca1}$	$H_{ca}$	$H_{ca1}$	$L$
圆柱形	240	304	—	330	—	482
圆台形	240	444	100	330	—	452
圆柱-圆台形	240	356	100	330	200	452
球形	240	240	—	330	—	457

对于吸热器的窗口采用一种凹形球面石英窗,其结构参数如图 3 所示,主要起到密封、对进入吸热器腔体的光辐射进行二次分配的作用,其直径  $D_{qw}$  为 240 mm,  $D_{qw1}$  为 160 mm,  $H_{qw}$  为 22 mm,  $H_{qw1}$  为 6 mm,中间凹面为球形,曲率半径由  $D_{qw1}$ 、 $H_{qw}$ 、 $H_{qw1}$  的值共同决定。

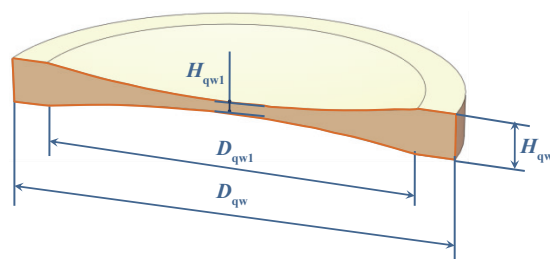


图3 凹形球面石英窗

Fig. 3 Spherical concave quartz window

## 2 光学模拟方法与验证

### 2.1 光学模拟方法

本文采用基于蒙特卡洛射线追迹法(MCRT)的光学软件 OptisWorks 进行分析,该软件已大量应用于 SDCR 系统光学分析,如课题组颜健等<sup>[12-13]</sup>已利用该软件,对腔体吸热器的光学性能进行了系统研究。

为获得高的光学性能,腔体吸热器是太阳能碟式聚光系统中最常用的设计,大多数传热传质及热化学反应过程都在太阳能腔体吸热器中进行。因此对吸热器的光学性能进行评价就十分必要,吸热器的光学性能通常包括光学效率、吸热器接收表面的局部聚光比( $LCR$ )和用于表征能流分布均匀性指标的非均匀系数,吸热器的光学效率 $\eta$ 可根据式(1)计算:

$$\eta = \frac{E_{ca}}{\pi R^2 \cdot W_0 \cdot \rho_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $E_{ca}$ ——腔体吸热器接收表面吸收的总能量,  $W$ ;  $W_0$ ——太阳直射辐照强度值,  $W/m^2$ ;  $\rho_d$ ——碟式聚光器镜面反射率。

本文采用 OptisWorks 软件计算吸热器的能流分布过程中会对吸热器进行网格划分,令第  $i$  个网格区域接收的面积为  $A_i$ 、接收的能流值为  $E_i$ ,则吸热器在第  $i$  个网格区域的局部聚光比  $C_i$  可用式(2)表示:

$$C_i = \frac{E_i}{A_i \cdot W_0} \quad (2)$$

设  $C_{i-\max}$  为在所有吸热器的网格单元中的最大局部聚光比,则  $C_{i-\max}$  可表示为:

$$C_{i-\max} = \max\left(\frac{E_i}{A_i \cdot W_0}\right) \quad (3)$$

吸热器腔体的能流分布通常采用非均匀系数来表征其能流分布的均匀性,由式(4)表示:

$$V_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{(n-1) \bar{E}^2}} \quad (4)$$

## 2.2 方法验证

为验证本研究中采用该方法计算的准确性,本文采用改进后的 Jeter's<sup>[14]</sup>模型进行验证。如图 4 所示,在 Jeter's 验证模型的焦点平面上方,增加 1 个厚度  $H_t$  为 8 mm 厚的石英窗,并在距离石英窗  $H_l$  为 10 mm 处增加 1 个测试用的能流接收平面, Jeter's 模型的参数保持不变,其余参数分别为光波长  $\lambda = 587 \text{ nm}$ ,石英窗的吸收率  $k_\lambda = 1.4 \text{ m}^{-1}$ ,石英窗的折射率  $n = 1.5$ 。

当光辐射直射在抛物碟上,反射光线经过石英窗时会发生折射、反射和吸收现象,同时由于模型的对称性,光辐射到达测试平面时将形成一个光斑。所以首先根据理论方法计算出测试平面上光斑的直径和光斑处的总能量,然后再和采用本文方法计算的光斑直径和光斑处的总能量进行对比分析,若对比数据一致则证明该方法是可靠的。

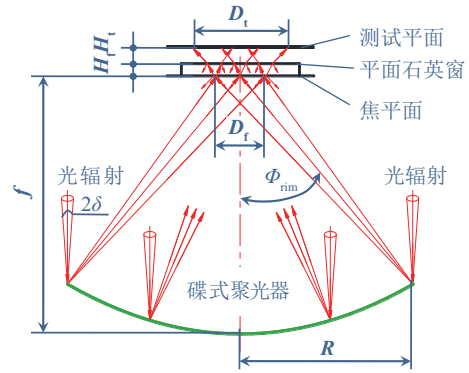


图4 改进后的Jeter's验证模型

Fig. 4 Modified Jeter's validation model

首先对测试平面的光斑直径进行理论计算。如图 4 所示,可得:

$$\phi_{nm} = \arctan \frac{4f \times R}{4f^2 - R^2} \quad (5)$$

Jeter's 模型位于焦平面上光斑直径的直径为:

$$D_t = \frac{2R}{\cos(\phi_{nm} + \delta)} \times \frac{\sin \delta}{\sin \phi_{nm}} \quad (6)$$

光辐射在进入石英窗和射出石英窗时在界面会发生折射,则折射方向遵循斯涅尔(Snell)折射定律。对测试平面光斑直径的计算如式(7)所示,经计算  $D_t = 69.8 \text{ mm}$ 。

$$D_t = D_t + 2H_t \tan \left[ \arcsin \frac{\sin(\phi_{nm} + \delta)}{n} \right] + 2H_l \tan(\phi_{nm} + \delta) \quad (7)$$

然后对测试平面光斑的总能量进行理论计算。光辐射经过石英窗的总透射率为<sup>[15]</sup>:

$$T = (1 - \rho_{qw})^2 \cdot e^{-k_\lambda \cdot l} \quad (8)$$

式中,  $l$ ——光辐射在石英窗中经过的总长度。

则经石英窗透射达到测试平面的总能量为:

$$E_t = \pi \cdot R^2 \cdot W \cdot \rho_d \cdot T \quad (9)$$

式中,  $R$ ——Jeter's 模型中碟式聚光器的直径;  $W$ ——Jeter's 模型中太阳直射辐照强度。

通过式(8)、式(9)可求出在测试平面的总能量为 3433 W。

采用 OptisWorks 软件光学仿真得到测试平面焦斑能流分布的结果如图 5 所示,光斑直径近似为 69.8 mm,与式(7)理论计算结果相同;仿真得到达到测试平面的总能量为 3436 W,与通过式(8)、式(9)理论计算的误差为 0.09%,两者之间的吻合度很好。综上可知,采用 OptisWorks 软件计算非常可靠。

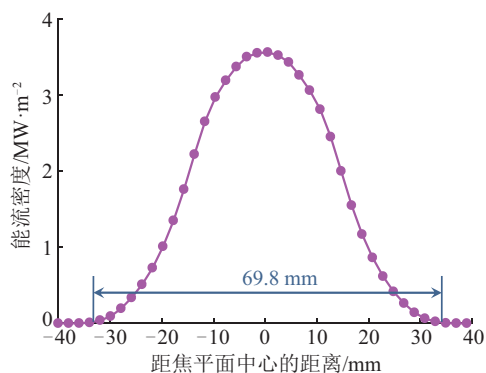


图5 测试平面的能流分布与光斑直径

Fig. 5 Flux distribution and hot spot diameter of test plane

### 3 腔体吸热器的光学性能

SDCR 系统在工作时受太阳张角、云层的遮挡和系统本身位置精度等因素的影响,为了顺利展开本项目的研究,提出以下假设:1)太阳直射辐照强度恒定为  $W=1000 \text{ W/m}^2$ , 太阳入射光锥半角恒定为  $\delta=4.65 \text{ mrad}$ ; 2)忽略云层遮挡对系统的影响; 3)碟式聚光器为理想工作状态,忽略安装误差、镜面斜率微观误差和跟踪误差,聚光器表面为镜面反射; 4)吸热器内表面为漫反射,反射率、吸收率均恒定; 5)石英窗表面为镜面反射。

石英窗的光学特性参数如表 2 所示。

表 2 石英窗光学特性参数<sup>[16]</sup>Table 2 Optical property of the quartz window<sup>[16]</sup>

光波长/ $\mu\text{m}$	折射率	吸收率/ $\text{m}^{-1}$
0.2~2.7	1.51	1.4
2.7~ $\infty$	1.48	1000

#### 3.1 平面石英窗腔体吸热器光学性能

圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形腔体 4 种吸热器采用平面石英窗时,平面石英窗的直径为 240 mm,厚度为 8 mm。采用 OptisWorks 软件计算得到吸热器光学效率分别为 91.01%、90.77%、90.88%和 90.89%,光学效率基本相等;吸热器表面的能流分布云图如图 6c 所示,吸热器接收表面的  $LCR$  分布如图 6a 所示,图 6a 中是以吸热器顶点  $O_s$  (图 2)为起始点,以  $L$  的展开线为坐标的  $x$  轴,从图 6a 可发现,圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形的  $LCR$  分布曲线均会发生突变(能流分布曲线突然断裂),这是由于吸热器顶面和吸热器侧表面结构发生突变所引起;4 种结构吸热器的非均匀系数和最大局部聚光比如图 6b 所示,其中非均匀系数分别为 0.60、0.86、0.70 和 0.74,其中最大局部聚光比分别为 1050.0、1350.0、1190.0 和 1080.0;对比采用平面石英窗的 4 种吸热器光学性能发现,4 种吸热器的光学效率基本相同,

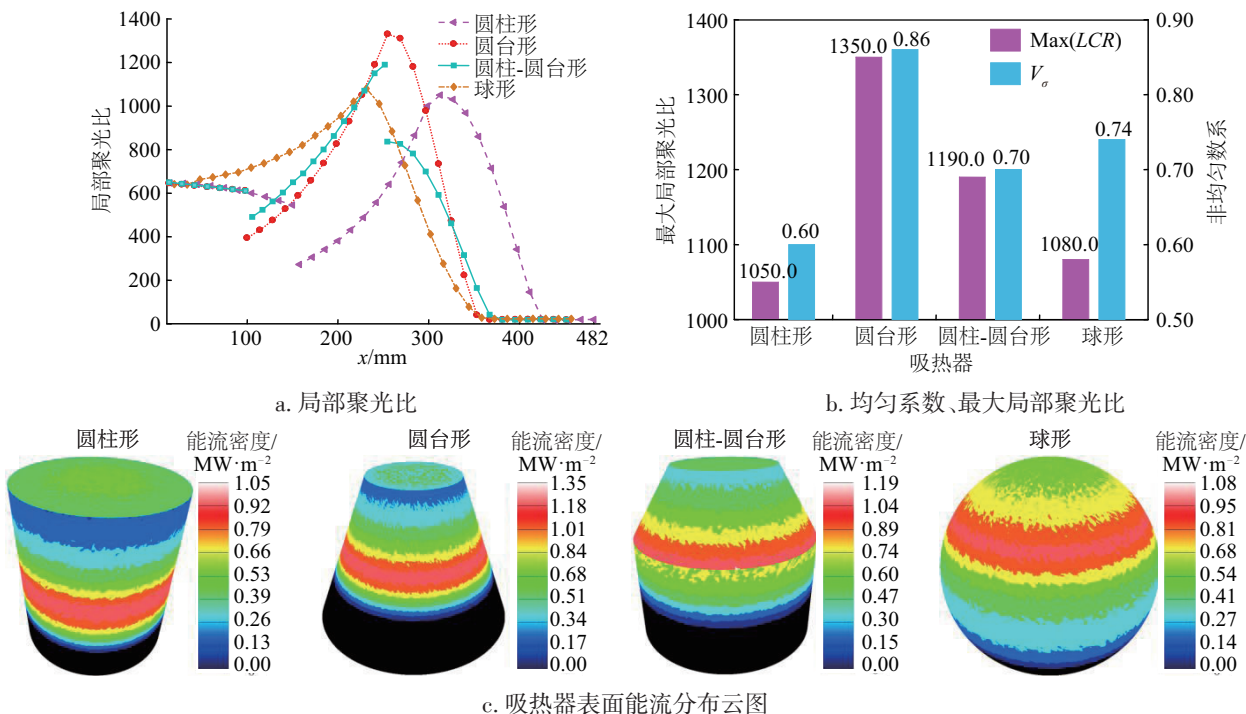


图6 平面石英窗腔体吸热器光学性能

Fig. 6 Optical properties of cavity receiver with plane quartz window



但圆柱形吸热器非均匀系数比圆台形、圆柱-圆台形和球形分别下降 30.23%、14.29% 和 18.92%，最大局部聚光比下降 22.22%、11.76% 和 2.78%。因此，采用平面石英窗的圆柱形腔体吸热器具有最佳光学性能。

### 3.2 凹形球面石英窗腔体吸热器光学性能

圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形腔体吸热器采用凹形球面石英窗时。采用 OptisWorks 软件计算得到吸热器光学效率分别为 90.00%、89.82%、89.87% 和 89.96%，光学效率基本相等；吸热器表面的能流分布云图如图 7c 所示，吸热器接收表面的 LCR 分布如图 7a

所示。从图 7a 中可发现，圆柱形吸热器的峰值最小，分布曲线相对较平稳；4 种结构吸热器的非均匀系数和最大局部聚光比如图 7b 所示，其中非均匀系数分别为 0.36、0.62、0.54 和 0.60，其中最大局部聚光比分别为 743.7、922.2、916.5 和 1000.4；对比采用凹形球面石英窗的 4 种吸热器光学性能发现，4 种吸热器的光学效率基本相同，但圆柱形吸热器非均匀系数比圆台形、圆柱-圆台形和球形分别下降 41.94%、33.33% 和 40.00%，最大局部聚光比下降 19.36%、18.85% 和 25.66%。因此，采用凹形球面石英窗的圆柱形腔体吸热器具有最佳光学性能。

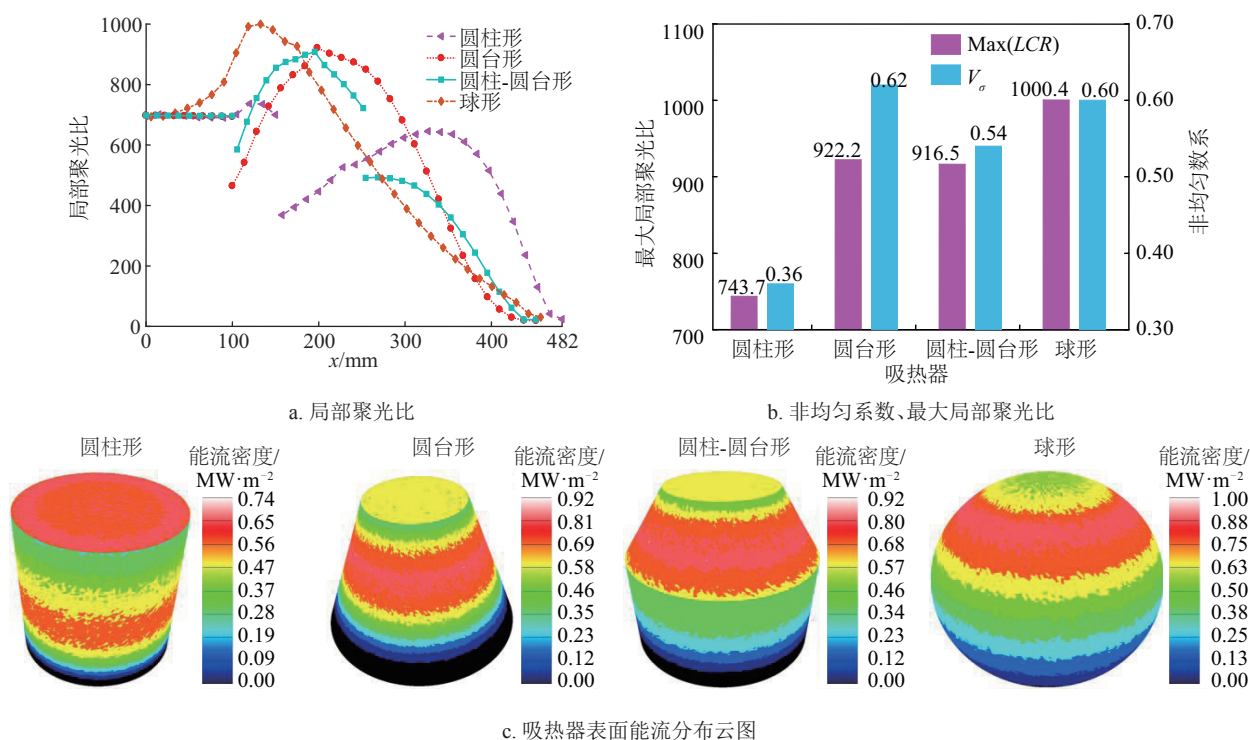


图7 凹形球面石英窗腔体吸热器光学性能

Fig. 7 Optical properties of cavity receiver with spherical concave quartz window

与平面石英窗腔体吸热器光学性能进行对比，采用凹形球面石英窗与平面石英窗时的圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形 4 种吸热器光学效率基本维持不变，但非均匀系数分别下降 40.00%、27.91%、22.86% 和 18.92%，最大局部聚光比分别下降 29.17%、31.69%、22.98% 和 7.37%；因此采用凹形球面石英窗的 4 种吸热器比采用平面石英窗吸热器的接收表面具有更均匀的能流分布和更小的局部聚光比峰值。

## 4 结 论

在 SDCR 系统中，提出一种用于腔体吸热器的凹形球面形窗，并设计等开口、等面积以及等高度三者共同

约束的圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形 4 种吸热器。基于 OptisWorks 软件，对采用凹形球面石英窗的 4 种吸热器进行光学性能仿真分析，并与采用平面石英窗时 4 种吸热器的光学性能进行对比分析，得到以下主要结论：

1) 采用平面石英窗时，光学性能最佳的吸热器为采用圆柱形方案的吸热器，其非均匀系数比圆台形、圆柱-圆台形和球形分别下降 30.23%、14.29% 和 18.92%，最大局部聚光比分别下降 22.22%、11.76% 和 2.78%。

2) 采用凹形球面石英窗时，光学性能最佳的吸热器为采用圆柱形方案的吸热器，其非均匀系数比圆台形、圆柱-圆台形和球形分别下降 41.94%、33.33% 和

40.00%,最大局部聚光比分别下降 19.36%、18.85%和 25.66%。

3)对比采用凹形球面石英窗和平面石英窗的圆柱形、圆台形、圆柱-圆台形和球形吸热器光学性能时发现其光学效率基本相同,而采用凹形球面石英窗比采用平面石英窗的 4 种吸热器非均匀系数分别下降 40.00%、27.91%、22.86%和 18.92%,最大局部聚光比分别下降 29.17%、31.69%、22.98%和 7.37%;4 种不同结构的吸热器采用平面石英窗或采用凹形球面石英窗时,都是圆柱形腔体吸热器具有最佳的光学性能,对比两者的光学性能指标,光学效率基本相等,但采用凹形球面比采用平面石英窗的吸热器非均匀系数从 0.60 下降到 0.36,最大局部聚光比从 1050.0 下降到 743.7。因此 4 种不同结构吸热器中采用凹形球面石英窗的光学性能要远远好于采用平面石英窗的情况;且当采用凹形球面石英窗时,圆柱形吸热器具有最均匀的能流分布及最小的聚光比峰值。

#### [参考文献]

- [1] LI X L, XIA X L, LI Z H, et al. Effects of double windows on optical and thermal performance of solar receivers under concentrated irradiation[J]. Solar energy, 2019, 184: 331-344.
- [2] 毛前军, 谢鸣, 帅永, 等. 太阳辐射强度对太阳能腔式吸热器热流密度的影响[J]. 太阳能学报, 2013, 34(10): 1818-1822.  
MAO Q J, XIE M, SHUAI Y, et al. Effect of incident solar irradiation on radiation flux distribution of a solar cavity receiver[J]. Acta energiae solaris sinica, 2013, 34(10): 1818-1822.
- [3] 何雅玲, 杜保存, 王坤, 等. 太阳能腔式熔盐吸热器随时空变化的光-热-力耦合一体化方法、机理分析及其失效准则研究[J]. 科学通报, 2017, 62(36): 4307-4320.  
HE Y L, DU B C, WANG K, et al. Study on the coupled photon-thermal-stress integration method, characteristics with time and failure criterion in the solar molten salt cavity receiver[J]. Chinese science bulletin, 2017, 62(36): 4307-4320.
- [4] HE Y L, CUI F Q, CHENG Z D, et al. Numerical simulation of solar radiation transmission process for the solar tower power plant: From the heliostat field to the pressurized volumetric receiver[J]. Applied thermal engineering, 2013, 61(2): 583-595.
- [5] DU B C, HE Y L, ZHENG Z J, et al. Analysis of thermal stress and fatigue fracture for the solar tower molten salt receiver[J]. Applied thermal engineering, 2016, 99: 741-750.
- [6] CUI F Q, HE Y L, CHENG Z D, et al. Study on combined heat loss of a dish receiver with quartz glass cover[J]. Applied energy, 2013, 112: 690-696.
- [7] HELLER P, PFANDER M, DENK T, et al. Test and evaluation of a solar powered gas turbine system[J]. Solar energy, 2006, 80(10): 1225-1230.
- [8] DU B C, QIU Y, HE Y L, et al. Study on heat transfer and stress characteristics of the pressurized volumetric receiver in solar power tower system[J]. Applied thermal engineering, 2018, 133: 341-350.
- [9] WANG F Q, SHUAI Y, TAN H P, et al. Researches on a new type of solar surface cladding reactor with concentration quartz window[J]. Solar energy, 2013, 94: 177-181.
- [10] 颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 直径 17.70 m 抛物碟式聚光装置的设计与研制[J]. 太阳能学报, 2018, 39(9): 2544-2552  
YAN J, PENG Y D, CHENG Z R. Design and develop for 17.70 m solar parabolic dish concentrated device[J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(9): 2544-2552
- [11] BELLOS E, BOUSI E, TZIVANIDIS C, et al. Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators[J]. Energy conversion and management, 2019, X2: 100013.
- [12] YAN J, PENG Y D, CHENG Z R. Optimization of a discrete dish concentrator for uniform flux distribution on the cavity receiver of solar concentrator system[J]. Renewable energy, 2018, 129: 431-445
- [13] YAN J, CHENG Z R, PENG Y D. Effects of geometrical parameters of a dish concentrator on the optical performance of a cavity receiver in a solar dish-Stirling system[J]. International journal of energy research, 2018, 42: 2152-2168.
- [14] JETER S M. The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors[J]. Journal of solar energy engineering, 1986, 108: 219-225.
- [15] 赵彦钊, 殷海荣. 玻璃工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 143-145.  
ZHAO Y Z, YIN H R. Glass technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 143-145.
- [16] CHEN X, XIA X, DONG X, et al. Integrated analysis on the volumetric absorption characteristics and optical performance for a porous media receiver[J]. Energy conversion and management, 2015, 105: 562-569.

## INFLUENCE OF SPHERICAL CONCAVE QUARTZ WINDOW ON OPTICAL PROPERTIES OF CAVITY RECEIVER OF DISH SYSTEM

Nie Duzhong<sup>1,2</sup>, Yan Jian<sup>1</sup>, Peng Youduo<sup>1</sup>, Liu Yongxiang<sup>1</sup>, Zeng Huifan<sup>1,2</sup>, Peng Deping<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Institute of Intelligent Equipment Technology, Hunan Vocational College of Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** The non-uniform and high-strength heat flux load will reduce the working efficiency, safety and in-service life of the cavity receiver. A spherical concave quartz window was proposed to improve optical performances of the cavity receiver, such as flux distribution, local concentration ratio and so on. Based on the Monte Carlo ray tracing method, the optical performances of four cavity structure cavity receivers were studied, taking the cavity receivers constrained by equal opening, equal area and equal height into account. The results showed that the non-uniformity coefficient of four kinds of cavity receivers with plane quartz windows was 0.60, 0.86, 0.70 and 0.74, respectively, and the maximum local concentration ratio was 1050.0, 1350.0, 1190.0 and 1080.0, respectively. The optical efficiency of four kinds of cavity receivers with spherical concave quartz window was basically the same as the one with plane quartz window, but the non-uniformity coefficient of cavity receivers decreased to 0.36, 0.62, 0.54 and 0.60, respectively, and the maximum local concentration ratio decreased to 743.7, 922.2, 916.5 and 1000.4, respectively. The optical performances of the cavity receiver with spherical concave quartz window were significantly improved, compared with that with plane quartz window, and the cylindrical cavity receiver had better optical performance than the other ones.

**Keywords:** solar energy; parabolic concentrator; optical performance; flux distribution; cavity receiver; quartz window